

U. R. 2P. I.

QUELQUES DONNEES SUR LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Jean-Pierre BOUILLET

Mai 1996

SOMMAIRE

| | |
|---|------|
| INTRODUCTION..... | p.1 |
| GENERALITES..... | p.1 |
| - Historique..... | p.1 |
| - Objectifs de l'analyse végétale..... | p.1 |
| FACTEURS INFLUENCANT LA COMPOSITION MINERALE DE LA PLANTE..... | p.2 |
| - Relation rendement/teneur minérale..... | p.2 |
| - Influence des facteurs internes sur la composition minérale du végétal..... | p.3 |
| - Influence des facteurs externes sur la composition minérale du végétal..... | p.5 |
| ETAPES DANS L'ETABLISSEMENT D'UN DIAGNOSTIC FOLIAIRE..... | p.6 |
| - Echantillonnage..... | p.6 |
| - Méthodes analytiques de référence..... | p.7 |
| - Interprétation des résultats analytiques..... | p.7 |
| RESULTATS..... | p.9 |
| - Palmier à huile, Cocotier..... | p.9 |
| - Hévéa..... | p.11 |
| - Essences forestières tempérées..... | p.13 |
| - Essences forestières tropicales..... | p.15 |
| CONCLUSION..... | p.16 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | p.17 |

QUELQUES DONNEES SUR LE DIAGNOSTIC FOLIAIRE

INTRODUCTION

Le Conseil Scientifique de l'UR2PI a retenu lors de sa première réunion, en novembre 1995, que "*Malgré son caractère prospectif, la mise au point d'un outil de diagnostic foliaire, facile à utiliser et à transférer au Développement doit faire l'objet de recherches*". C'est dans cette optique que la présente note a été rédigée. Elle repose en grande partie sur "*L'Analyse Végétale dans le Contrôle de l'Alimentation des Plantes tempérées et tropicales*" (MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Elle n'a pour ambition que de faire un premier point sur l'élaboration et l'utilisation pratique de cet outil. Elle n'abordera que peu les principes de la physiologie de la nutrition minérale (HELLER *et al.*, 1991 ; KRAMER et KOZLOWSKI, 1979): mécanismes d'absorption, de translocation ou de transferts internes, rôle des éléments minéraux dans le métabolisme,... qui devront être possédés par les chercheurs qui seront impliqués dans cette problématique de recherche.

GENERALITES

Historique

Les premiers travaux relatifs à l'analyse végétale datent du début du siècle (RICHTER, 1910, sur cerisier ; STEGLICH, 1900, sur prunier ; VAN SLYKE *et al.*, 1905, sur poirier et pêcher). Ces auteurs, cités par MARTIN-PREVEL *et al.* (1984), avaient déjà mis en évidence qu'il existait des relations entre la composition minérale de la plante et son état nutritionnel. Cependant on peut considérer que cette méthode d'investigation a commencé véritablement à être développée, à partir de 1922, par LAGATU et MAUME sur la vigne. Leurs études se sont particulièrement intéressées à l'analyse des feuilles. Ils sont ainsi à l'origine du diagnostic foliaire défini comme "*l'état chimique, à un instant donné, d'une feuille prise en place convenablement choisie*" (LAGATU et MAUNE, 1929, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Objectifs de l'analyse végétale

Trois types de démarches peuvent être suivies pour la conduite de la nutrition végétale.

1) L'évaluation directe du besoin externe (fertilisants, eau, lumière...) de la culture au moyen de courbes de réponse (élément par élément) ou de surfaces de réponse (combinaison de plusieurs éléments). Cette approche, classique, présente l'inconvénient de fournir des résultats incomplètement transposables: dans l'absolu la validité des études se limite au terrain et à (aux) l'année(s) de leur réalisation.

2) L'évaluation analytique du pouvoir nutritionnel du sol. Ces études qui reposent en bonne partie sur des analyses chimiques de sol se heurtent à la difficulté de reproduire correctement, par un extractif chimique, l'activité d'un système racinaire *in situ*. En outre dans les sols tropicaux, souvent très profonds, il n'est pas toujours aisé de définir la limite des horizons utilisés par le système racinaire et le degré d'exploration de chacune des couches de terrain. Plus généralement, même si l'analyse des sols présente un intérêt évident, l'inconvénient de cette démarche est de ne s'intéresser qu'aux disponibilités offertes aux plantes pour leur alimentation

mais pas à l'état de cette alimentation.

3) L'évaluation analytique de l'état de nutrition de la plante par rapport à son besoin interne du moment, ce besoin étant défini comme "*pleinement satisfait lorsque la plante contient l'ensemble des éléments minéraux en quantités et en proportion telles qu'aucune modification de cet état, dans quelque sens que ce soit, ne peut augmenter ses performances*". Cette démarche repose sur l'analyse de la teneur en éléments minéraux de certains des tissus de la plante, cette concentration reflétant l'aptitude de la plante à absorber et à utiliser les minéraux à sa disposition.

Cette troisième approche, complémentaire des deux premières, est intéressante en tant que:

- Méthode de contrôle; la teneur en éléments minéraux des tissus peut, par exemple, aider à savoir si une fertilisation apportée a l'effet escompté ou si au contraire l'opération risque de n'être que fugace? Ce type d'investigation est particulièrement important sur des plantes pérennes où la réponse à l'engrais n'est pas forcément immédiate et donc rapidement mesurable (accroissement en volume...) et doit se comprendre sur plusieurs mois ou années.

- Moyens d'extrapolation des résultats à d'autres conditions de lieu et de temps: on connaît la composition minérale d'une plante et on tente, pour la production observée, de "se recalculer" sur les courbes précédemment établies et d'estimer les apports externes nécessaires pour atteindre un niveau désiré de production. Ce type d'approche peut aussi être très utile pour identifier les désordres nutritionnels, les phénomènes de déficience ou de carence minérale et tenter d'y remédier avant l'apparition de symptômes visibles ou de pertes de production très sensibles.

FACTEURS INFLUENCANT LA COMPOSITION MINERALE DE LA PLANTE

Relation rendement / teneur minérale

La composition minérale des tissus d'une plante varie en fonction du rendement. Ainsi PREVOT et OLLAGNIER (1956, cités par LOUE *et al.*, 1993), ont établi pour la teneur en un élément minéral limitant la courbe de croissance ou de production de l'arachide qui se retrouve globalement pour l'ensemble des végétaux supérieurs autotrophes (cf Figure N°1).

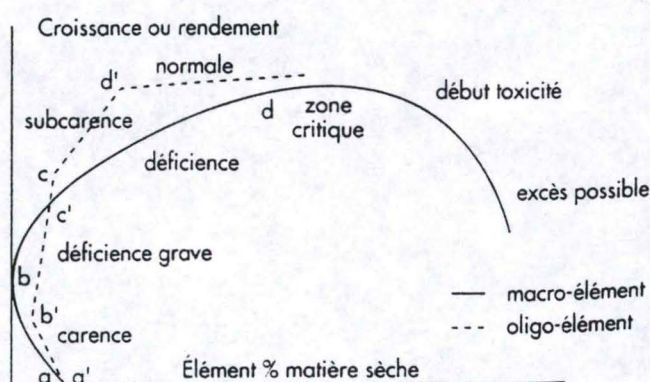


Figure N°1: Relation entre croissance ou rendement et la teneur en un élément nutritif (in: LOUE *et al.*, 1993)

Plusieurs zones apparaissent:

Macro-éléments

a et b: zone de carence grave avec l'apparition de symptômes plus ou moins caractéristiques (DELL *et al.*, 1995),

c: zone de déficience où concentration et rendement croissent plus ou moins linéairement,

d: niveau critique à partir duquel l'augmentation de la concentration n'induit pas un gain de croissance. Le niveau maximum de rendement est atteint et une consommation de luxe apparaît,

e: l'augmentation de la teneur engendre l'apparition de toxicité, reflétant un déséquilibre par excès.

Oligo-éléments

La représentation curvilinéaire n'est pas satisfaisante car on passe très vite des teneurs déficientes de la plante (parties a', b', c' et d') à des teneurs normales.

Il faut cependant souligner que les seuils ainsi définis ne s'entendent que si l'ensemble des **autres facteurs se trouvent à un niveau déterminé** et ceci d'une façon non limitante. D'un point de vue pratique c'est ici que se situe la principale difficulté, étant donné l'influence de nombreux facteurs internes et externes.

Influence des facteurs internes sur la composition minérale du végétal

Dans des conditions de milieu données, un nombre important de facteurs internes influent sur les teneurs en éléments minéraux des tissus. Ils correspondent à des caractéristiques propres du végétal ou sont liés à son métabolisme:

- Espèce; à titre d'exemple la capacité d'échange cationique du système racinaire, qui conditionne en premier lieu l'alimentation minérale de la plante, peut varier, par unité de matière sèche, de 1 à 10 entre mono et dicotylédones. On peut espérer lever partiellement cet obstacle si on travaille sur une espèce donnée ou du moins sur des espèces aux caractéristiques comparables.

- Génotype à l'intérieur d'une même espèce; travailler sur des clones présentent à ce titre des avantages évidents.

- Porte-greffe; la nature du porte-greffe semble influencer la composition cationique des feuilles (observations sur pommiers, poiriers, pêchers...) (GAUTIER, 1976, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Dans le cadre de l'UR2PI le problème pourrait se poser dans le cadre de la conduite des parcs à greffes d'eucalyptus.

- Parties de la plante; on peut noter dans une plante d'importantes variations de la teneur minérale des tissus selon les organes: racines, tige (bois/écorce), fleurs, fruits, feuilles (limbe/pétiole) (cf figure N°2). Celles-ci sont dues, en particulier, aux transferts internes d'éléments minéraux entre organes. Pour contourner cette difficulté les analyses ne portent en général que sur les seules feuilles, lieu des principales transformations biochimiques dans la plante. Il existe cependant des exceptions: étude de la composition minérale de la tige pour la canne à sucre (HUMBERT, 1968, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

- Position de la feuille; la composition minérale des feuilles peut varier sensiblement suivant la position de la branche le long du tronc et celle de la feuille sur la branche comme ceci a été mis en évidence, par exemple, au Congo sur eucalyptus hybrides (LOUBELO, 1985 ; LOUMETO, 1986).

- Date du prélèvement/Age de la plante; les teneurs en éléments minéraux des différents organes varient au cours de la vie de la plante (cf Figure N°2); pour une espèce donnée il sera

donc nécessaire d'étudier la variation de la teneur minérale des tissus au cours de l'année et d'arrêter la période la plus adaptée à la caractérisation de l'état nutritionnel de la plante.

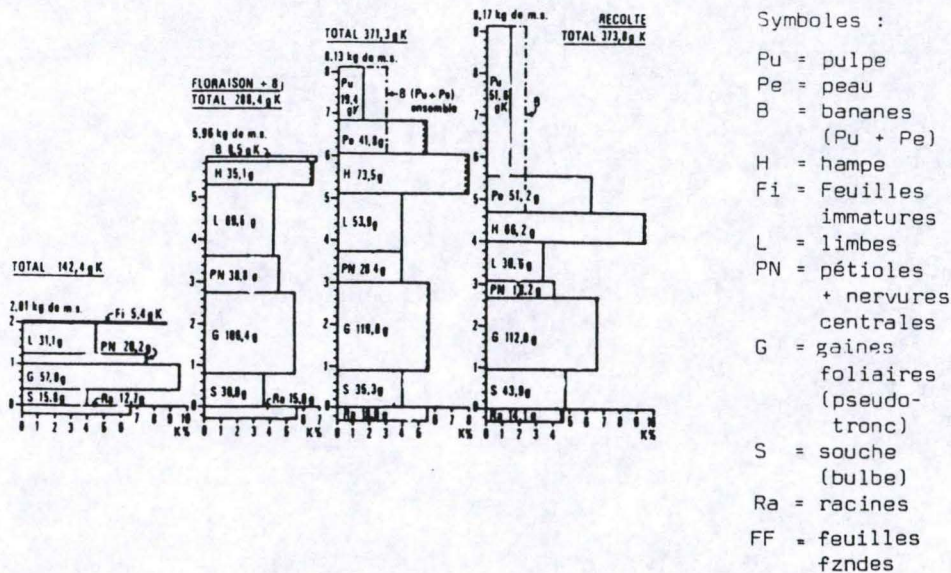


Figure N°2 Evolution de la teneur en potassium des différents organes d'un bananier normalement alimenté au cours de son développement (d'après MARTIN-PREVEL, 1970, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

- Interactions entre éléments:

INTERACTIONS DANS L'APPROVISIONNEMENT MINÉRAL DES TISSUS. Certains ions gênent ou au contraire favorisent l'absorption d'autres ions dans les tissus: par exemple il existe un antagonisme K^+/Mg^{++} ou K^+/Ca^{++} mais une synergie K^+/NH_4^+ . Ces interactions s'observent à des intensités différentes aux divers niveaux de la plante. Par exemple, dans le cas du bananier, il existe une compétition $K^+/Ca^{++}/Mg^{++}$ pour l'absorption par le système racinaire, dans le bulbe, les pétioles et les nervures mais seulement K^+/Ca^{++} dans les limbes et aucune dans les gainnes foliaires (MARTIN-PREVEL, 1981, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

INTERACTIONS DANS LES EFFETS DE LA NUTRITION MINÉRALE. Ces interactions s'entendent relatives aux effets sur le métabolisme ou la croissance de la plante. Elles peuvent ou non être de même nature (synergie ou antagonisme) que les interactions relatives à l'absorption racinaire: chez l'ananas une synergie K^+/Mg^{++} a pu être mise ainsi en évidence (MARTIN-PREVEL, 1961 cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Quel que soit leur mode d'action (directe ou indirecte, simple ou en cascade) il est essentiel de préciser que ces interactions ne sont pas des propriétés en propre des éléments par rapport à "La Plante" mais qu'elles peuvent varier suivant le génotype, l'âge, la teneur en éléments minéraux des tissus,.... Elles doivent donc bien se comprendre "toutes choses étant égales par ailleurs".

Influence des facteurs externes sur la composition minérale du végétal

Les facteurs externes sont nombreux dont nous allons citer les principaux.

Caractéristiques physico-chimiques du sol

Pour une richesse minérale donnée, un sol permet une croissance d'autant plus forte qu'il est perméable (exploration par les racines) et aéré (respiration des racines). L'alimentation minérale de la plante dépend aussi, bien sûr, des teneurs en éléments minéraux présents dans le sol. Cependant ceux-ci doivent être sous des formes effectivement disponibles pour la plante et dépendent donc étroitement:

- de la capacité d'échanges du complexe absorbant. Une capacité d'échanges trop faible peut dans certains cas expliquer le faible impact d'une fertilisation sur la production d'une culture. Cependant il existe des contre-exemples: meilleure absorption du potassium pour les pommiers sur sols légers à faible capacité d'échange (LEVY, 1965, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984)
- des possibilités de chélation des ions métalliques avec les composés organiques (LOUE, 1993)
- de la valeur du pH qui a une forte influence sur la disponibilité et l'assimilation des éléments minéraux (VILAIN, 1993).

Alimentation hydrique

L'alimentation minérale est intimement dépendante de l'alimentation hydrique, toute déficience ou excès d'eau ayant un impact sur le fonctionnement des racines, la production de la culture et la teneur en éléments minéraux des tissus. Une faible humidité du sol peut entraîner un très net ralentissement de la croissance ou au contraire l'apparition de toxicité en cas de trop forte concentration de la solution du sol en certains ions comme Na^+ , Cl^- ,...

Dans le cas des plantations de l'UAIC ce facteur sera d'autant plus déterminant que:

- les sols en saison sèche se situent, au moins jusqu'à 1.2m, à la limite du point de flétrissement permanent (DAGBA, 1996),
- même en saison des pluies la teneur en eau se situe au tiers inférieur de la réserve utile, zone où l'eau est difficilement mobilisable par la plante (DAGBA, 1996),
- la pluviométrie peut varier fortement d'une année à l'autre. Par exemple à Pointe-Noire entre 1951 et 1964 on relève un minimum annuel de 297 mm, un maximum de 2050mm, pour une moyenne de 1283mm (JAMET, 1969).

Température du sol

La température au niveau des racines peut affecter le processus d'absorption et, par la même, la teneur en éléments minéraux des tissus. D'après CORNILLON (1980) cité par MARTIN-PREVEL *et al.* (1984) *"la plupart des espèces réagissent à une élévation de la température par une élévation parallèle de la teneur en éléments minéraux, jusqu'à un maximum atteint à une température variable selon l'espèce et l'élément analysé"*. COOPER (1973) a classé les espèces en quatre catégories en fonction de leur comportement (cf Figure N°3), celles du groupe D, les plus nombreuses, satisfaisant au principe précédent.

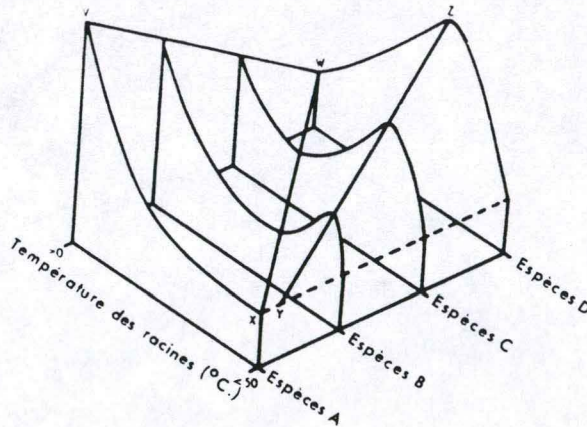


Figure N°3: Relation générale entre la température des racines et la teneur en éléments minéraux des tissus des plantes (d'après COOPER, 1973, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Maladies et parasites

L'état sanitaire de la plante peut influencer sur la teneur minérale de ses tissus. Inversement un déséquilibre (déficience ou excès) en certains éléments minéraux peut conduire à une sensibilité accrue aux maladies et attaques parasitaires. De telles observations ont été faites, par exemple, sur des pommiers infestés par des nématodes (TRZCINSKI, 1978, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984), sur des palmiers à huile présentant des dépérissements due au fusarium (OLLAGNIER et RENARD, 1976, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984) ou encore sur des pêcheurs infestés par *Pseudomonas sp.* (VIGOUROUX et HUGUET, 1979, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Il est à noter aussi que les insecticides peuvent conduire, par des actions sur la synthèse des protéines, à des modifications dans les équilibres cationiques des tissus. Celles-ci ont été notées, par exemple, sur la vigne (CHABOUSSOU, 1969, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Il serait intéressant d'étudier si de tels phénomènes s'observent sur les eucalyptus de l'UAIC traités au glyphosate.

ETAPES DANS L'ETABLISSEMENT D'UN DIAGNOSTIC FOLIAIRE

Trois étapes doivent être suivies pour établir un diagnostic foliaire (nous considérerons que l'analyse végétale ne portera que sur les seules feuilles).

Echantillonnage

Il se situe à différents niveaux.

- Echantillonnage inter peuplements

Il est nécessaire de disposer, pour des conditions stationnelles données (climat, sol,...) ou du moins assez semblables, d'un réseau d'essais qui couvrent, notamment, une gamme importante de formules fertilisantes (éléments, doses,...).

- Echantillonnage intra-peuplement

A ce niveau se posent les problèmes du nombre et de la représentativité des individus échantillons.

- Echantillonnage intra-arbre

Il se pose en termes différents suivant le but du diagnostic:

1) Diagnostic nutritionnel

Il est nécessaire d'identifier le stade physiologique *ad hoc* des feuilles (ou leur âge) et leur position sur la plante (cf § précédent). Cette phase, essentielle, est d'autant plus délicate que ce ne sont pas forcément les mêmes feuilles qui conviennent le mieux aux diagnostic des différents éléments: cas du zinc par rapport aux éléments majeurs (MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). En pratique on choisit souvent les feuilles où sont relevées les teneurs extrêmes et souvent les plus fortes.

2) Identification de symptômes nutritionnels

L'échantillonnage devra prendre en compte les feuilles où les symptômes sont visibles (à différents stades d'évolution) et d'autres d'apparence saine.

Remarque: Une telle démarche devra aussi être menée au sein du peuplement (individus sains/attaqués).

Méthodes analytiques de référence

Les utilisateurs de l'analyse foliaire doivent pouvoir compter sur un même résultat quel que soit le laboratoire où l'échantillon est envoyé. Mais ces laboratoires ne possèdent pas tous le même matériel et n'utilisent pas forcément les mêmes méthodes. C'est pourquoi régulièrement un même échantillon est envoyé aux laboratoires et la confrontation des résultats permet de limiter les dérives. Certains laboratoires ne peuvent participer à ces chaînes d'analyse mais peuvent cependant étalonner leurs résultats par des échantillons de référence établis pour 15 plantes (dont un échantillon d'Eucalyptus).

D'autre part des méthodes de référence ont été établies qui codifient strictement le mode de minéralisation de l'échantillon végétal et le dosage des éléments. Bien que non utilisables en routine, elles permettent aux laboratoires de vérifier la validité des résultats obtenus par leurs méthodes propres.

Interprétation des résultats analytiques

D'un point de vue pratique le but du diagnostic foliaire est de définir à partir d'une courbe générale telle que définie précédemment (cf Figure N°1):

- le niveau critique à partir duquel le taux d'un élément ne peut plus baisser sans entraîner de troubles ou de diminution de rendement,
- la zone d'alimentation optimum (au delà du niveau critique et sans alimentation de luxe).

Il est alors théoriquement possible d'établir des normes qui permettent de guider la conduite de la fertilisation de ces cultures, ce qui a été fait par exemple en Nouvelle-Zélande sur pommier (BOLLARD *et al.*, 1962, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Cependant, comme il a déjà été indiqué, ces courbes restent indicatives et il n'est pas possible d'arrêter, même pour un génotype et une station donnée, une teneur en élément correspondant à un optimum absolu. L'interprétation nécessite de tenir compte des facteurs internes et externes déjà mentionnés et de leurs interactions. C'est dans cette optique que deux méthodes d'analyses sont classiquement employées:

- le système DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System); il a été développé par BEAUFILS (1961 et 1973, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Il a pour finalité de prendre en compte non seulement la valeur de la concentration pour chaque élément mais aussi les rapports entre teneurs des différents éléments. Cette balance entre éléments est présentée sous la forme de rayons d'une roue. Les données sont les rapports entre éléments, pour lesquels sont définies trois zones: 1) bon équilibre 2) tendance 3) déséquilibre (cf Figure N°4) Il faut cependant noter que cette méthode nécessite de nombreuses données de base pour donner des indices suffisamment précis.

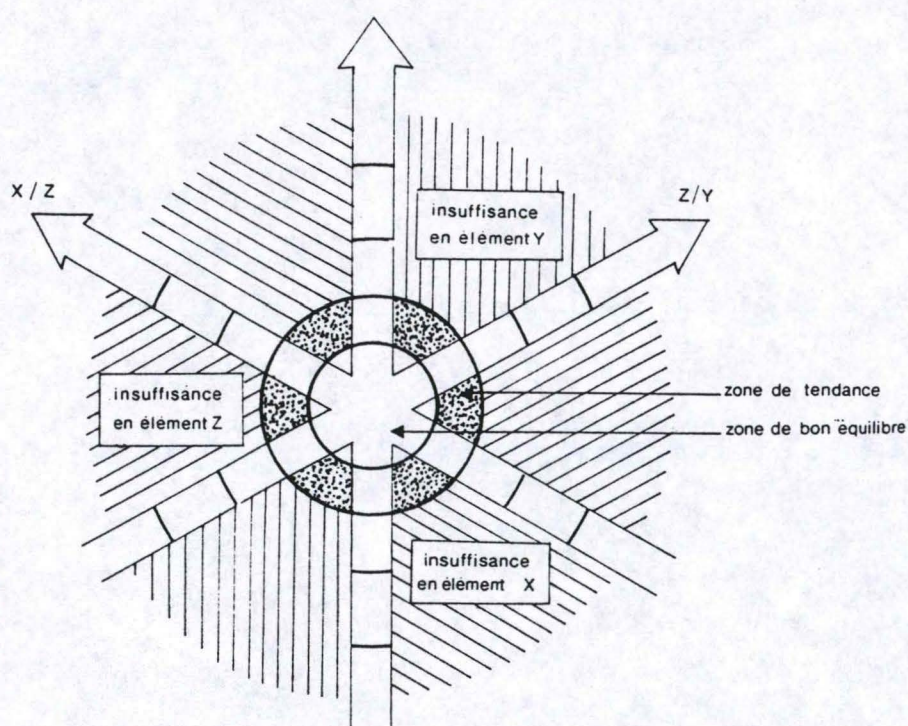


Figure N°4: Diagramme utilisé par le système DRIS pour l'interprétation des résultats d'analyse minérale (in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

- l'analyse factorielle; elle permet de prendre en compte en une seule analyse l'ensemble des variables qui semblent pertinentes. Des logiciels comme STATITCF en permettent une utilisation aisée (PHILIPPEAU, 1992 ; TOMASSONNE, 1988)

Quel que soit le type de méthode utilisée il est essentiel de rappeler que l'interprétation ne peut en aucun cas être "mécanique" mais, au contraire, nécessite du chercheur une bonne connaissance du milieu et de la physiologie de la plante sur laquelle il travaille.

RESULTATS

Dans ce chapitre seront indiqués rapidement les principaux résultats obtenus pour les espèces arborées - hors arbres fruitiers - tropicales et tempérées.

PALMIER A HUILE, COCOTIER

(d'après ROGNON, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984)

Le diagnostic foliaire a été développé simultanément sur les deux cultures et les résultats sont très semblables. Aussi il ne sera fait mention ici que de ceux se rapportant au palmier à huile.

Historique

Les premières analyses végétales sur palmiers à huile ont été conduites en 1947 par HALLE (MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). A partir de 1950 l'IRHO a systématiquement pratiqué le diagnostic foliaire parallèlement aux essais de fumure minérale. Cette ancienneté dans l'approche fait que cette méthode est depuis près de 20 ans **l'instrument privilégié** pour la conduite de la **fertilisation** (OLLAGNIER et OCHS, 1981, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

Organe prélevé

Les analyses portent principalement sur le limbe des folioles des feuilles (palmes). Des études sur la variation de la concentration minérale en fonction du rang de la feuille font apparaître des gradients de concentration, positifs ou négatifs suivant les éléments (PREVOT et PEYRE de MONTBRETON, 1958, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Il est donc nécessaire d'effectuer les prélèvements sur des feuilles d'un même rang : en pratique sur deux couples de folioles de la partie centrale la feuille 1 (la plus jeune), 9 ou 17.

Date/heure de prélèvement

Les concentrations variant en cours d'année principalement sous l'effet des pluies et de l'insolation, le prélèvement s'effectue toujours en début de saison sèche. C'est à cette période que les teneurs sont les plus stables. Pour limiter l'influence des variations de concentrations au cours de la journée, les prélèvements sont effectués entre 7 et 11 h le matin. Pour réduire l'influence d'une lixiviation éventuelle des éléments minéraux dans la feuille il est nécessaire d'attendre au moins 36 heures au moins après une pluie de 20 mm pour réaliser cette opération.

Nombre d'arbres par échantillon

Pour faire apparaître des différences de teneurs de 5 à 10% il est nécessaire d'effectuer des prélèvements sur 15 à 25 individus par population échantillonnée.

Modalités pratiques

Tout un ensemble de dispositions pratiques ont été arrêtées (choix des individus, prélèvements sur la foliole, conditionnement des échantillons, études particulières,...).

Résultats

1) Niveaux critiques

* Macro-éléments

Des niveaux critiques ont été identifiés pour le potassium, le magnésium et le soufre et des "lignes critiques" pour N et P qui donnent les niveaux critiques de N (resp. P) en fonction des teneurs de P (resp. N). Les valeurs observées peuvent varier en fonction des caractéristiques stationnelles.

* Oligo-éléments

Dans les endroits où sont situées les plantations de palmiers à huile il apparaît que l'alimentation en oligo-éléments semble suffisante et que les teneurs foliaires en oligo-éléments sont plus sous la dépendance du pH que sous celle des teneurs du sol. Il a cependant été mis en évidence des teneurs foliaires correspondant à des seuils de carence pour le bore dans le jeune âge et le cuivre dans des sols riches en matière organique.

2) Programmation normalisée des fumures

Des barèmes indiquant la dose à appliquer en fonction de la teneur foliaire sont utilisés dans la pratique (cf Figure N°5) et régulièrement actualisés.

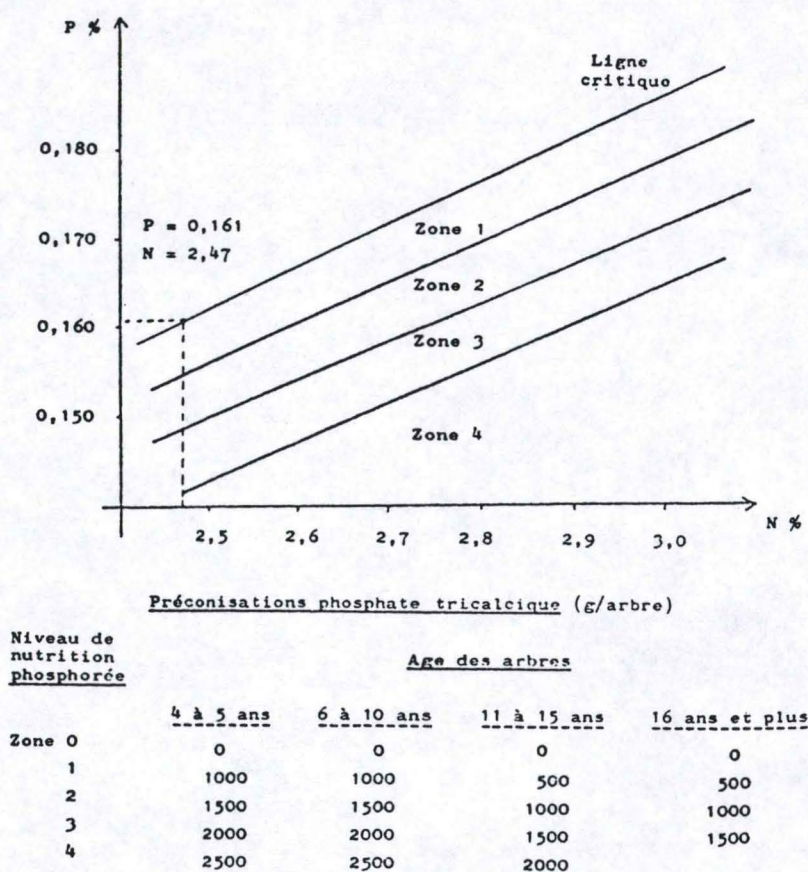


Figure N°5: Schéma de fumure de palmiers à huile et doses préconisées en fonction du niveau de déficience et de l'âge des arbres (in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

 HEVEA

(d'après GENER et de la SERVE, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984)

Historique

Les premières analyses végétales sur hévéa ont été conduites en 1941 par CHAPMAN (cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984). Cependant le diagnostic foliaire a été véritablement développé sous l'impulsion de BEAUFILS (1958, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984), ses travaux ayant abouti à l'élaboration du système DRIS précédemment mentionné. Comme pour les cultures précédentes le diagnostic foliaire est couramment utilisé pour guider la fertilisation des plantations.

Organe prélevé

On prélève deux feuilles poussant à l'ombre, à la base de l'étage terminal. Elles présentent l'avantage, par rapport à celles exposées à la lumière, d'être plus sensibles aux éléments N et P.

Date de prélèvement

Les prélèvements sont effectués au minimum 100 jours après la refoliation, cette période correspondant à l'activité photosynthétique maximale (CHUA, 1970, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984),).

Mais il est difficile de connaître exactement l'âge exact des feuilles échantillons et donc d'avoir une référence commune à tous les prélèvements. La méthode pour contourner cette difficulté repose sur:

- le fait qu'après les 100 premiers jours, les teneurs en Ca, N, P et K varient linéairement avec l'âge des feuilles (augmentation pour Ca et diminution pour les autres éléments). Des régressions linéaires de N (*resp.* P et K) en fonction de Ca peuvent être établies, avec des coefficients de détermination de fortes valeurs,
- l'hypothèse que, pour un sol donné (et donc une teneur en Ca échangeable donnée), les concentrations foliaires à 100 jours en Ca sont égales à des teneurs de référence, précédemment établies.

Les différences observées avec ces teneurs de référence permettent d'effectuer les corrections pour N, P et K à partir de droites de régression obtenues: par exemple de plus fortes valeurs de Ca indiquent que les feuilles ont plus de 100 jours et que donc les teneurs foliaires en N, P et K sont trop faibles; les corrections vont donc amener à augmenter ces valeurs.

Nombre d'arbres par échantillon

On retient le nombre de 30 arbres échantillons pour une parcelle homogène de 20 à 30 hectares.

Modalités pratiques

Tout un ensemble de dispositions pratiques ont été arrêtées (fiches de renseignements, conditionnement des échantillons, ...).

Résultats

1) Teneur en élément minéral

A partir d'essais de fertilisation il a été possible d'établir pour N, P, K et Mg:

- dans un premier temps, les seuils de teneurs foliaires en dessous desquels une réponse à la fertilisation pouvait être espérée (niveaux critiques),
- ensuite, 4 classes de teneurs foliaires (de faibles à très hautes) et ceci pour les différents groupes de clones plantés.

2) Balance entre éléments

Les valeurs des rapports N/P, N/K, K/P, K/Mg et Mg/P correspondant aux différentes zones d'équilibre/déséquilibre entre ces éléments ont été établies (cf tableau N°1).

Tableau N°1: Equilibres limites des rapports des teneurs en éléments minéraux des feuilles d'hévéa (in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

| N/P | N/K | K/P | K/Mg | Mg/P |
|--------------------------|------|------|------|------|
| DESEQUILIBRE | | | | |
| 19.2 | 3.61 | 8.26 | 6.02 | 1.96 |
| TENDANCE AU DESEQUILIBRE | | | | |
| 17.2 | 3.07 | 7.07 | 5.12 | 1.68 |
| NORMAL | | | | |
| 13 | 1.09 | 4.69 | 3.22 | 1.13 |
| TENDANCE AU DESEQUILIBRE | | | | |
| 11 | 1.45 | 3.50 | 2.42 | 0.85 |
| DESEQUILIBRE | | | | |

ESSENCES FORESTIERES TEMPEREES

(d'après TOUZET, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984)

Historique

Le diagnostic foliaire pour les espèces de forêt tempérées s'est véritablement développé à partir de 1955 et les premiers résultats pratiques (seuils de carence, zone critique,...) ont été obtenus au début des années 60. Cette méthode est surtout employée pour les espèces de reboisement artificiel, c'est à dire essentiellement les résineux et les peupliers.

Organe prélevé

Les analyses portent principalement sur les feuilles. Les prélèvements sont effectués:

- pour les résineux sur les 2e ou 3e verticilles à partir du bourgeon terminal,
- pour les feuillus dans la zone moyenne de la couronne entre la base du premier tiers en partant du sommet et la mi-hauteur.

Pour limiter les biais dus à des différences d'éclairement ou d'exposition, l'échantillon est récolté d'une manière égale dans les quatre directions orthogonales.

Date de prélèvement

De nombreuses études ont porté sur la variation des teneurs foliaires en fonction des saisons, par exemple sur *Populus sp.* (TOUZET et HEINRICH, 1970, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984) ou sur *Picea sp.* (TAMM, 1971, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

D'une manière générale:

- les concentrations en N, P et K diminuent du printemps à l'automne, avec cependant la présence de paliers,
- celles en Mg décroissent aussi mais presque linéairement,
- les teneurs en Ca augmentent puis se stabilisent pour éventuellement décroître en automne,
- les variations des concentrations en oligo-éléments sont mal connues.

Cependant des variations sensibles existent entre espèces, régions et années. En pratique on privilégie les époques où la dispersion des résultats est la moins forte, c'est à dire, pour l'hémisphère Nord:

- fin octobre pour les résineux,
- fin août pour les feuillus.

En outre les prélèvements ne doivent pas s'effectuer après une forte pluie.

Nombre d'arbres par échantillon

Suivant les éléments minéraux, le nombre d'arbres nécessaires pour mettre en évidence une différence donnée entre populations varie sensiblement. En pratique il est conseillé de prendre 4 à 5 arbres dans des peuplements monoclonaux (peupliers par exemple) et 25 à 30 dans les autres cas (on prend alors des individus dominants/codominants).

Résultats

Un certain nombre de normes générales ont été établies, en particulier pour *Populus sp.* et *Pinus sp.* (cf tableau N°2). Elles ne sont cependant qu'indicatives à cause des variations liées aux conditions stationnelles, aux années, aux climats, à l'âge des peuplements,... qu'il est nécessaire d'intégrer pour établir un diagnostic raisonné. Elles peuvent être quand même très utiles dans le cas de peuplements s'écartant notablement des valeurs indiquées et ceci pendant plusieurs années de suite.

Tableau N°2: Norme de teneurs foliaires proposée pour le genre *Pinus* par ZÖTTL (1971, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984).

| | Seuil de carence | Déficiences | Bonne nutrition | Très bonne croissance |
|----------|------------------|-------------|-----------------|-----------------------|
| N (%) | 0.7 - 1.6 | 1.2 | 1.5 - 2.2 | 1.8 - 3.2 |
| P (%) | 0.06 - 0.10 | 0.09 | 0.13 - 0.20 | 0.2 - 0.3 |
| K (%) | 0.30 - 0.45 | 0.4 | 0.6 - 1.2 | 0.55 - 0.90 |
| Mg (%) | 0.05 - 0.09 | 0.05 | 0.1 - 0.2 | 0.06 - 0.13 |
| Ca (%) | 0.05 | 0.05 | 0.1 - 0.5 | 0.05 - 0.24 |
| Fe (ppm) | | 30 | 45 - 200 | |
| Mn (ppm) | 6 - 7 | 4 | 20 - 800 | 20 |
| Cu (ppm) | | 2 | 4 - 6 | |
| Zn (ppm) | | 5 | 10 - 80 | |
| B (ppm) | | 10 | 15 - 35 | |

Dans l'état actuel des connaissances - du moins celles de 1984 - le diagnostic foliaire en foresterie tempérée est surtout compris comme permettant de mieux appréhender les besoins alimentaires des peuplements mais pas encore comme un instrument privilégié pour conduire leur fertilisation.

ESSENCES FORESTIERES TROPICALES

(d'après BRUNCK, in: MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984)

Historique

Le diagnostic foliaire en foresterie tropicale date du début des années 60 et n'a été, d'une manière générale, que peu développé. Il est en fait surtout employé pour la caractérisation qualitative de déficience nutritive marquée.

Organe prélevé

Les analyses portent principalement sur les feuilles même si d'autres organes peuvent à l'occasion être étudiés (bourgeons, racines, bois,...). La position des feuilles échantillons varie suivant les espèces étudiées. Pour les Eucalyptus (*E.camaldulensis*, *E.deglupta*, *E.grandis*, *E.platyphylla*, *E.teriticornis*) on prélève la deuxième ou troisième feuille adulte sur un rameau non fructifère, issu de la moitié inférieure d'une branche située dans la partie supérieure du houppier. Dans le cas des Eucalyptus hybrides du Congo (*E.PF1*, *E.teriticornis*grandis* et *E.urophylla*grandis*) on peut penser que cette position ne différerait que peu de celles indiquées.

Date/heure de prélèvement

Le prélèvement s'effectue généralement durant la saison sèche ou au début de la saison des pluies. Ils sont réalisés entre 7 et 10 h du matin et 36 heures au moins après la dernière pluie.

Nombre d'arbres par échantillon

On retient généralement le nombre de 20 arbres échantillons par population. Il pourrait sans doute être diminué dans le cas de peuplements clonaux comme ceux de l'UAIC.

Résultats

Hors l'utilisation déjà mentionnée pour les diagnostics de carence (BRUNCK et MALAGNOUX, 1976, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984 ; BRUNCK, 1974, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984), les études restent fragmentaires et ont été surtout entreprises dans le cadre de l'évaluation des exportations minérales, même si certaines ont pour but une meilleure compréhension des besoins physiologiques des arbres (VAN DE DRIESSE, 1974, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984 ; SCHMITT et RAFALY, 1996).

Pourtant les résultats obtenus en milieu tropical sur palmier, cocotier et hévéa montrent bien que l'obtention de **résultats pratiques** pour la gestion de la **fertilisation** des plantations est **possible**. Ceci semble d'autant plus réalisable si on travaille, comme dans le cas des plantations de l'UAIC, sur des peuplements clonaux et dans des conditions de milieu *a priori* assez peu variables.

CONCLUSION

Parallèlement à la poursuite indispensable des expérimentations classiques sur la fertilisation des peuplements et aux analyses de sol, la mise au point d'un outil de diagnostic foliaire applicable aux plantations d'*Eucalyptus* de l'UAIC paraît très importante et ceci tant d'un point de vue scientifique que technique.

1) Ce domaine, peu exploré jusqu'alors pour les essences forestières et, particulièrement, tropicales, devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes de la nutrition des arbres et plus globalement des relations sol-plante.

2) Une connaissance plus fine des besoins nutritionnels des plantations devrait conduire à une amélioration sensible de leur gestion grâce à une meilleure adaptation des techniques culturales (fertilisation, travail du sol, ...). Par exemple, le diagnostic foliaire devrait contribuer à:

- la prise en compte de paramètres comme la topographie, l'enherbement ou l'historique de la croissance des parcelles pour l'élaboration d'une stratification raisonnée du massif et une adaptation du régime de fertilisation à chacune de ces strates.

- une conduite efficace des parcs multiplicatifs semi-intensifs. La densification des pied-mères facilite beaucoup la gestion des parcs multiplicatifs tout en abaissant le coût de production des boutures mais conduit à une forte compétition minérale et hydrique entre individus. Il faut donc impérativement que les techniques culturales soient adaptées, d'une manière précise et continue, pour que ces parcs produisent des boutures en nombre et qualité suffisante et ceci pendant plusieurs années.

Un nombre conséquent de difficultés, dont certaines ont déjà été mentionnées, devront être surmontées. Cependant, sous réserve d'une implication forte de la recherche, on peut espérer, vu l'homogénéité génétique du matériel végétal et les connaissances déjà acquises, arriver à des résultats significatifs à moyen terme (5-10 ans).

BIBLIOGRAPHIE

BEAUFILS ER, 1958. Le diagnostic physiologique I et II, Rev. Gén. Caout., N°35, p.769-922, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

BEAUFILS ER, 1961. Les déséquilibres dans la composition chimique de l'hévéa. La méthode du diagnostic physiologique. Thèse de docteur-ingénieur, Fac. Sc. Paris, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

BEAUFILS ER, 1973. Système intégré de diagnostic et de recommandation (DRIS). Soil Sc. Bulletin N°1, Univ. of Natal-Pietermaritzburg, p.40-42, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

BOLLARD EG *et al.*, 1962. Leaf analysis in the assessment of nutritional status of apple tree. New Zealand J. of agr. Res., N°5, p.5-6, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

BRUNCK, 1974. Dépérissement physiologique des *Pinus kesiya* au Mangoro. Document interne CTFT, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

BRUNCK F, MALAGNOUX M, 1976. Note sur le dépérissement du Framiré (*Terminalia ivorensis* A.Chev) en Côte d'Ivoire. Ses relations avec la nutrition minérale des plants. Document interne CTFT, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

CHABOUSSOU F, 1969. Recherches sur les facteurs de pullulation des acariens phytophages de la vigne à la suite des traitements pesticides des feuillages. Thèse Fac. Sci. Paris, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

CHAPMAN GW, 1941. Leaf analysis and plant nutrition. Soil Sci., Vol. 52, N°63, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

CHUA SE, 1970. Physiology of foliar senescence and abscission in *Hevea brasiliensis*. Thèse Univ., Singapour, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

COOPER AJ, 1973. Root temperature and plant growth. Res. Rev. 4, CAB, p.31-43, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

CORNILLON P, 1980. Influence de la température des racines sur la croissance et le développement des plantes. Ann. Agr., Vol.31, N°1, p.63-64, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

DAGBA E, 1996. Rapports d'activités 1996. Document ORSTOM, Laboratoire de Physiologie Végétale, MAA - UR 35, Pointe-Noire, Congo. 12p.

DELL B, MALAJCZUK N, GROVE TS, 1995. Nutrient disorders in plantation eucalypts. ACIAR Monograph 31, 110p.

GAUTIER P, 1976. Diagnostic foliaire des pommiers, poiriers et pêchers. Etudes par analyse factorielle en composantes principales sur plusieurs années. 4e Coll. Intern. Contr. Alim. Pl. Cult., I, p.119-126, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

HELLER R, ESNAULT R, LANCE C, 1990. Physiologie végétale. 1. Nutrition. Paris: Masson, 273 p.

HUMBERT KC, 1968. The growing of cane sugar. Amsterdam, Elsevier Publishing Cy, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

JAMET R, 1969. Carte pédologique de reconnaissance. Feuille de Pointe-Noire. Document ORSTOM, 103p.

KRAMER PJ, KOZLOWSKI TT, 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press, 811p.

LAGATU H, MAUME L, 1929. Le diagnostic foliaire et son degré de sécurité. C.R. Ac. des Sciences de France, 188, 1062, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

LEVY JF, 1965. La fumure des vergers peut-elle être établie en fonction de leurs besoins réels. Agric. Oct., p.307-310, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

LOUE A, 1993. Oligo-éléments en agriculture. SCPA.NATHAN, 577p.

LOUMETO JJ, 1986. Contribution à l'étude de la distribution minérale dans les eucalyptus du Congo. Université de Rennes, 134p., Thèse de Doctorat de troisième cycle en Ecologie.

LOUBELO E, 1990. Etude comparative de quelques éléments du fonctionnement de deux peuplements d'eucalyptus au Congo. Université de Rennes, 150p., Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques.

MARTIN-PREVEL P, 1961. Potassium, calcium et magnésium dans la nutrition de l'ananas en guinée. V. Données de l'analyse foliaire. Fruits, Vol.16, p.539-557, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

MARTIN-PREVEL P, 1981. Recherches sur la nutrition du bananier en potassium, azote et autres éléments en relation avec les anomalies de qualité du fruit. Document interne IRFA, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

MARTIN-PREVEL P, GAGNARD J, GAUTIER P, 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Paris: Technique et Documentation - Lavoisier, 810p.

OLLAGNIER M, RENARD, JM, 1976. The influence of potassium on the resistance of oil palms to fusarium. Fertilizer use and plant health, in: Inter. Potash Inst., p.157-166, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

OLLAGNIER M, OCHS R, 1981. Gestion de la nutrition minérale des plantations industrielles de palmiers à huile. *Economie d'engrais, Oléagineux* Vol.36, N°8-9, p.409-421, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

PHILIPPEAU G, 1992. Composantes principales. Comment interpréter les résultats? Collection STAT-ITCF, 63p.

PREVOT P, OLLAGNIER M, 1956. Méthode d'utilisation du diagnostic foliaire. Analyse des plantes et problèmes des engrais minéraux. VIIIe Congr. Intern. Bot. Paris, II, p.176-192, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

PREVOT P, PEYRE de MONBRETON C, 1958. Etude des gradients en divers éléments minéraux selon le rang de la feuille chez le palmier à huile. *Oléagineux* Vol.13, N°3, p.317-321, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

RICHTER L, 1910. Chemical composition, *Landw. Versuch. Sta.*, 73, 457-477, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

SCMITT L, RAFALY, 1996. La fertilisation des plantations industrielles de *Pinus kesiya* de la FANALAMANGA. FAC/FOFIFA, sous presse.

STEGLICH, 1900. Düngungsversuche mit Obstbäume, *Agr. Chem.*, 29, 292, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

TAMM CO, 1971. Optimum nutrition of trees in field experiment, a long term approach in forest nutrition research. Recent advances in nutrition, London, GORDON and BREACH, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

TOMASSONNE R, 1988. Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle discriminante. Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 56p.

TOUZET G, HEINRICH JC, 1970. Concentrations foliaires en azote, phosphore, potassium et calcium du peuplier "I 214". *Annales AFOCEL*, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

TRZCINSKI T, 1978. Le diagnostic chimique des tissus végétaux en tant que méthode d'estimation de la nutrition minérale des plantes en général et du pommier en particulier. *Revue de l'Agriculture Belge*, Vol.2, N°31, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

VAN DEN DRIESSE R, 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review*, N°40, p.347-394, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

VAN SLYKE LL, TAYLOR OM, ANDREWS WH, 1905. *N.Y. Agr. Sta. Bul.*, 265, 1905, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

VIGOUROUX A, HUGUET CL, 1977. Influence du substrat de la culture sur la sensibilité du pêcher au dépérissement bactérien (*Pseudomonas mors-prunorum*, f.sp. *persicae*). C.R. Acad. Agr. France, 16, p.1095-1103, cités par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.

VILAIN M, 1993. La production végétale. Volume 1. Les composantes de la production. Agriculture d'Aujourd'hui, Sciences, Techniques, Application. Paris: Lavoisier, Coll. Technique et Documentation, 438p.

ZÖTTL, 1973. Diagnostic des troubles de la nutrition dans les peuplements forestiers. FAO/IUFRO, Doc. Ronéo, cité par MARTIN-PREVEL *et al.*, 1984.